

Andrés Asensio Ramos

1. Hemos desarrollado un código numérico que permite calcular las densidades moleculares en cada punto de cualquier modelo de atmósfera estelar resultante de simulaciones magneto-hidrodinámicas. Su aplicación permite obtener las densidades moleculares, bien suponiendo la aproximación de equilibrio químico instantáneo, o bien teniendo en cuenta los tiempos finitos de las reacciones moleculares de forma consistente con la variación temporal de las condiciones físicas del plasma. Con esta nueva herramienta de cálculo hemos logrado resolver el enigma de la estructura térmica de la cromosfera solar, pues 30 años después del descubrimiento de la existencia de intensas líneas de CO en la atmósfera solar seguía existiendo controversia sobre si el gas de la cromosfera solar es frío ($T < 3500$ K) o caliente ($T > 4500$ K). Para tal fin hemos investigado el rango de validez de la aproximación de equilibrio químico instantáneo, demostrando que en un medio dinámico como lo es una atmósfera estelar los tiempos finitos de formación y destrucción molecular implican que tengamos menos concentración de especies moleculares que lo que dicta la aproximación de equilibrio químico instantáneo. Como consecuencia, el gas frío que produce las intensas líneas de monóxido de carbono no llega mucho más allá de 700 km de altura en la atmósfera solar. Para tal fin, hemos investigado dicho problema mediante simulaciones hidrodinámicas que tienen en cuenta el fenómeno de propagación de ondas, la producción de choques y el intercambio de energía por radiación. Actualmente estamos investigando, en colaboración con el Dr. Martin Asplund, el impacto de la evolución química sobre la determinación de las abundancias del C, N y O en estrellas pobres en metales, para lo cual usamos modelos tridimensionales de las atmósferas de dichas estrellas de baja metalicidad, resultantes de simulaciones hidrodinámicas realistas. (Véase publicaciones 2 y 17. La publicación 1 sobre la banda G de la molécula de CH ha sido realizada gracias a la aplicación de estos mismos códigos).
2. Hemos generalizado a geometría esférica los métodos numéricos desarrollados por Trujillo Bueno & Fabiani Bendicho (1995) para la solución de problemas de transporte radiativo sin suponer ETL. Demostramos que las altas propiedades de convergencia de estos métodos basados en la iteración Gauss-Seidel y SOR se mantienen al pasar a geometría esférica. Estos métodos son idóneos para la solución de complejos problemas de transporte radiativo en astrofísica, pues el tiempo de cómputo por iteración es el mínimo que se puede alcanzar (similar al de la iteración Λ) y no requieren ni la construcción ni la inversión de matrices. Hemos desarrollado un complejo código de ordenador basado en los citados métodos, pero para el caso más general de geometría esférica y optimizado tanto para la síntesis de líneas atómicas como moleculares considerando modelos realistas con cientos de niveles y transiciones. Nuestro código de transporte radiativo lo hemos aplicado para investigar la excitación radiativa de líneas de H₂O en la envoltura caliente de la nube SgrB2. Mediante el análisis de observaciones realizadas con el satélite ISO y el radiotelescopio IRAM 30-m hemos podido estimar la abundancia de agua en esta región. Los resultados permitirán establecer mejor cuáles pueden ser las reacciones químicas importantes para la generación del agua en estas regiones y cuál puede ser la influencia de los campos de radiación externos. En el futuro aplicaremos estas nuevas herramientas de transporte radiativo para la investigación de otras regiones y otras especies moleculares. (Véase publicaciones 10, 11, 13, 14 y 22).
3. Hemos desarrollado un método muy general para poder calcular el efecto de un campo magnético sobre los niveles rotacionales de cualquier molécula diatómica, tanto en el régimen del efecto Zeeman lineal como en el de Paschen-Back. El método está basado en una muy eficiente diagonalización numérica del Hamiltoniano efectivo, cuyos elementos los expresamos mediante el álgebra de Racah del momento angular. Su combinación con nuestros métodos numéricos para la solución de la ecuación de transporte radiativo para los parámetros de Stokes, nos ha permitido predecir con gran precisión las señales de polarización inducidas por los efectos Zeeman y Paschen-Back en diversas líneas moleculares, lo que nos ha llevado a realizar varias observaciones espectropolarimétricas (véase el siguiente punto). Una de las ventajas con respecto a otros métodos existentes es que el nuestro es extremadamente general y permite incluir cualquier ingrediente físico previamente ignorado, como el de la estructura hiperfina, el cual podría resultar clave para una modelización rigurosa de la polarización de la luz en algunas líneas moleculares. (Véase publicaciones 9, 12 y 17).
4. Nuestro trabajo teórico sobre los efectos Zeeman y Paschen-Back en líneas moleculares (véase publicación 9), nos ha llevado a planear y realizar varias observaciones espectropolarimétricas de regiones

fuertemente magnetizadas del plasma solar, para lo cual hemos usado sobre todo un sofisticado polarímetro infrarrojo desarrollado previamente por nuestro grupo, el cual está basado en moduladores construidos con cristales líquidos ferro-eléctricos. Por una parte, hemos logrado observar por primera vez los perfiles de polarización inducidos por el efecto Zeeman en las líneas de FeH que se forman en el plasma frío de las manchas solares. Por otra parte, hemos descubierto en algunas regiones del espectro solar la existencia de perfiles anómalos de polarización, cuyo origen físico hemos demostrado que se debe a la acción del efecto Paschen-Back en líneas de CN. Con vistas a inferir a partir de este tipo de observaciones las condiciones físicas de las regiones más frías y magnetizadas del plasma de la atmósfera solar, hemos desarrollado y aplicado un código de inversión de perfiles de Stokes inducidos por los efectos Zeeman y Paschen-Back en líneas moleculares. Por otra parte, otros cálculos teóricos que hemos realizado nos han permitido predecir en detalle el espectro de polarización circular producido por la molécula de CH en la banda G del espectro estelar, e identificar algunas líneas espectrales de gran interés para la detección de campos magnéticos en estrellas de tipo solar mediante filtro-polarimetría en la banda G. El gran interés que este hallazgo supone para futuras investigaciones en magnetismo solar y estelar nos ha llevado a corroborar nuestras predicciones teóricas mediante observaciones espectropolarimétricas de dicha banda G, las cuales hemos realizado con el polarímetro ZIMPOL construido por nuestros colegas del ETH de Zurich. Estamos convencidos que nuestros trabajos facilitarán en el futuro cercano la aplicación del efecto Zeeman molecular como técnica de diagnóstico de campos magnéticos en otros campos de la astrofísica. (Véase publicaciones 3,4,5,7,12 y 17).

5. Finalmente, hemos investigado en gran profundidad las señales de polarización lineal producidas por procesos de “scattering” en líneas de MgH, C₂ y CN, cuya detección mediante observaciones espectropolarimétricas del limbo solar constituye probablemente uno de los descubrimientos más importantes de la última década. Para tal fin, hemos formulado el problema mediante el formalismo de la matriz densidad de la mecánica cuántica, lo que nos permite cuantificar correctamente la posible presencia de diferencias entre las poblaciones de los subniveles magnéticos pertenecientes a cada nivel atómico o molecular y la posibilidad de interferencias cuánticas entre ellos. Esta polarización atómica o molecular se debe a procesos de bombeo óptico producidos por el campo de radiación anisótropo de la atmósfera estelar, y constituye el origen físico verdadero de la polarización lineal que se origina por procesos de “scattering” tanto en líneas atómicas como moleculares. Esto es de gran interés para el diagnóstico de campos magnéticos caóticos y/o extremadamente débiles en astrofísica, pues dicha polarización atómica o molecular (y, por tanto, la polarización observada en una línea espectral) es sensible, mediante el efecto Hanle, a la presencia de dichos campos magnéticos. Nuestro trabajo se ha centrado por completo en el desarrollo y aplicación de toda una serie de métodos y códigos para la modelización e interpretación física rigurosa de tales señales de polarización lineal en líneas moleculares. Por ejemplo, hemos logrado explicar mediante simulaciones numéricas con modelos moleculares realistas las misteriosa polarización detectada en bandas de la molécula de CN (véase las publicaciones 17 y 20). Al tener en cuenta la diferente sensibilidad al campo magnético que tienen las líneas de C₂ y MgH observadas, hemos demostrado la presencia de un campo magnético débil y caótico en las regiones granulares de la fotosfera solar, lo que ha sido de gran importancia para una determinación más precisa de la energía magnética contenida en el Sol en calma (véase publicaciones 6, 8 y 17). Un ejemplo interesante del impacto e interés que nuestro trabajo tiene para el diagnóstico de campos magnéticos en otros campos de la astrofísica puede verse en la publicación 22, sobre la interpretación de la polarización observada mediante técnicas VLBI en máseres astronómicos.

A. Publicaciones en revistas con árbitro

1. Sánchez Almeida, J., Asensio Ramos, A., Trujillo Bueno, J. & Cernicharo, J. “G-Band Spectral Synthesis in Solar Magnetic Concentrations” (2001), *ApJ*, 555, 978
2. Asensio Ramos, A., Trujillo Bueno, J., Carlsson, M. & Cernicharo, J. “Non-equilibrium CO Chemistry in the Solar Atmosphere” (2003), *ApJ Letters* 588, 61
3. Asensio Ramos, A., Trujillo Bueno, J., & Collados, M. “Detection of Polarization from the E⁴II-A⁴II system of FeH in sunspot spectra” (2004), *ApJ Letters*, 603, 125
4. Uitenbroek, H., Miller-Ricci, E., Asensio Ramos, A., & Trujillo Bueno, J. “The Zeeman Effect in the G band” (2004), *ApJ*, 604, 960
5. Asensio Ramos, A., Trujillo Bueno, J., Bianda, M., Manso Sainz, R., & Uitenbroek, H. “Observation of the Molecular Zeeman Effect in the G Band” (2004), *ApJ Letters*, 611, 61
6. Trujillo Bueno, J., Shchukina, N., Asensio Ramos, A., “A substantial amount of hidden magnetic energy in the quiet Sun” (2004), *Nature*, 430, 326
7. Asensio Ramos, A., Trujillo Bueno, J., Collados, M. “Observation and modeling of anomalous CN polarization profiles produced by the molecular Paschen-Back effect in sunspots” (2005), *ApJ Letters*, 623, L57
8. Asensio Ramos, A., Trujillo Bueno, J. “ Evidence for Collisional Depolarization in the MgH Lines of the Second Solar Spectrum” (2005), *ApJ*, 635, L109
9. Asensio Ramos, A., Trujillo Bueno, J. “ Theory and Modeling of the Zeeman and Paschen-Back Effects in Molecular Lines” (2006), *ApJ*, 636, 548
10. Cernicharo, J., Goicoechea, J. R., Pardo, J. R., & Asensio Ramos, A. “ Warm Water Vapor around Sagittarius B2 ” (2006), en prensa

B. Publicaciones resultantes de conferencias de revisión invitadas

11. Asensio Ramos, A., & Trujillo Bueno, J. 2006, “ Very Efficient Methods for Multilevel Radiative Transfer in Atomic and Molecular Lines”, *EAS Publications Series*, 18, 25
12. Asensio Ramos, A. 2006, “ Theory, Observation and Modeling of the Zeeman and Paschen-Back effects in Molecular Lines”, in *Solar Polarization 4*, *ASP Conference Series*, en prensa

C. Publicaciones resultantes de contribuciones orales en congresos

13. Asensio Ramos, A., & Trujillo Bueno, J. 2003, “ Radiative Transfer in Molecular Lines”, *ASP Conf. Ser.* 288, *Stellar Atmosphere Modeling*, 335
14. Asensio Ramos, A., Trujillo Bueno, J., & Cernicharo, J. 2003, “ Radiative Transfer tools for the GTC”, *Science with GTC*, *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica Conference Series*, 16, 162
15. Asensio Ramos, A. 2003, “ Detection of polarization from the E⁴II-A⁴II system of FeH in sunspot spectra”, 1^{er} Congreso Nacional de Astrofísica Molecular, 44
16. Collados, M., Trujillo Bueno, J., & Asensio Ramos, A. 2003, “ New Spectropolarimetric Observations of Solar Coronal Filaments in the He I 10830 Å Multiplet”, in *Solar Polarization 3*, *ASP Conference Series*, 307, 468
17. Asensio Ramos, A., & Trujillo Bueno, J. 2003, “ Non-equilibrium Chemistry and Molecular Spectropolarimetry”, in *Solar Polarization 3*, *ASP Conference Series*, 307, 195
18. Asensio Ramos, A., Trujillo Bueno, J., & Cernicharo, J. 2001, “ Radiative transfer in molecular lines”, in *The Promise of the Herschel Space Observatory*, *ESA SP-460*, 265

D. Publicaciones en preparación con otros resultados de la tesis

19. Asensio Ramos, A., Trujillo Bueno, J. “ An efficient computer program for multilevel radiative transfer in spherical geometry” (2006)
20. Asensio Ramos, A., Trujillo Bueno, J. “ Scattering polarization in CN lines” (2006)

E. Publicaciones de otros resultados diferentes a los de la tesis

21. Elitzur, M., Asensio Ramos, A. “ A new exact method for line radiative transfer” (2006), MNRAS, 365, 779
22. Asensio Ramos, A., Landi Degl’Innocenti, E., & Trujillo Bueno, J. 2005 “ Dichroic Masers Due to Radiation Anisotropy and the Influence of the Hanle Effect on the Circumstellar SiO Polarization”, ApJ, 625, 985